

# 基于 X 射线的 BGA 空洞缺陷 3D 检测方法

须颖<sup>1,2,3</sup>, 刘永斌<sup>1,2</sup>, 安冬<sup>1,2</sup>, 邵萌<sup>1,2</sup>

(1. 沈阳建筑大学机械工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 沈阳建筑大学微纳检测与运动控制研究院, 辽宁 沈阳 110168; 3. 天津三英精密仪器股份有限公司, 天津 300399)

**摘要** 目的 对球栅阵列封装(Ball Grid Array, BGA)芯片中由于焊接过程中产生的气体未能及时逸出所致的空洞缺陷进行3D检测,以降低缺陷检测难度和提高准确率,为实现BGA产品的流水线检测奠定基础. 方法 利用X射线三维显微镜对BGA芯片进行扫描与重建得到3D模型,将模型等距切片后转为灰度图像,根据3D可视化结果和灰度直方图选择固定阈值进行全局阈值分割,将分割得到的二值图进行连通区域标记并计算各区域面积,最后采用积分法求取焊球和空洞体积并计算空洞率. 结果 与2D检测方法对比,该方法可以有效去除图像中的多元器件重叠的不利因素,可直接观察空洞缺陷的大小及位置;在BGA切片图像中标记分割阈值的等值面并测量焊球和空洞的直径,将测量结果与DR图像中的测量值对比,最大误差为 $3.726\text{ }\mu\text{m}$ ,表明该方法可以准确地分割焊球及空洞特征. 结论 该方法可以有效地检测出BGA中的空洞缺陷,并准确地计算出焊球和空洞体积及基于体积的空洞率.

**关键词** X射线;BGA;空洞缺陷;3D检测

中图分类号 TU391

文献标志码 A

## 3D Detection Method of BGA Void Defects Based on X-ray

XU Ying<sup>1,2,3</sup>, LIU Yongbin<sup>1,2</sup>, AN Dong<sup>1,2</sup>, SHAO Meng<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Micro-Nano Detection and Motion Control Institute, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 3. Sanying Precision Instruments Co. Ltd., Tianjin, China, 300399)

**Abstract:** In order to reduce the difficulty and improve the accuracy of defect detection, this paper studies the 3D detection method of void defects in Ball Grid Array (BGA) chips due to the gas failed to escape in time during welding. This method lays a foundation for the production line

收稿日期:2018-12-20

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0703903);辽宁省科学技术基金项目(20180550002);辽宁省高等学校基本科研项目(LJZ2017035);辽宁省重点研发计划项目(2017225016)

作者简介:须颖(1959—),男,教授,博士,主要从事CT扫描技术领域及超精密运动控制方面研究.

inspection of BGA products. The BGA chip is scanned and reconstructed by X-ray three-dimensional microscope to get a 3D model. The model is divided into several two-dimensional images at equal distances and then transformed into gray images. According to the results of 3D visualization and gray histogram, fixed thresholds are selected to segment the image globally. The binary image obtained by threshold segmentation is labeled with connected regions and the area of each region is calculated. Finally, the volume of welding balls and voids is calculated by integral method and the void rate is calculated. Compared with the 2D detection method, this method can effectively remove the disadvantageous factors of overlapping multiple elements in the image, and can directly observe the size and location of void defects. The equivalent surface of segmentation threshold is marked in BGA slice image, and the diameters of welding balls and voids are measured. The maximum error is 3.726  $\mu\text{m}$  by comparing the measured results with those in DR image. Experiments show that this method can accurately segment the characteristics of welding balls and voids, and accurately calculate the volume and void rate of welding balls and voids. This method can effectively detect void defects in BGA, and accurately calculate the volume of welding balls and voids and void rate based on volume.

**Key words:** X-ray; BGA; void defects; 3D defection

球栅阵列封装(Ball Grid Array, BGA)芯片采用位于芯片底部的阵列焊球代替常规引脚的方式,将芯片焊接到电路板上,焊点隐藏在芯片底部<sup>[1-2]</sup>.由于BGA结构设计不当或者生产工艺的不完善,致使BGA芯片存在多种常见的缺陷,如连焊、漏焊、偏移、裂纹和空洞等<sup>[3-4]</sup>.其中,空洞缺陷主要由焊接过程中高温状态下产生的气体未能及时逸出所致,在X射线DR图像中表现为黑色焊球区域内出现灰白色区域,在CT图中表现为白色焊球区域内出现黑色区域<sup>[5-7]</sup>.

BGA焊球中空洞的大小直接影响了芯片的力学性能和电学性能<sup>[8]</sup>,因此诸多学者对如何检测空洞缺陷展开了大量研究.目前BGA焊球的空洞缺陷检测主要使用基于X射线的二维图像的无损检测方法:A. Sa-Nguannam等<sup>[9]</sup>采用全局阈值分割的方法实现了简单背景下的BGA焊球空洞缺陷的检测;H. P. Shao等<sup>[10-11]</sup>采用基于空洞区域灰度值变化特征的新BLOB算法,实现了对比度较差的简单背景下的空洞缺陷检测;李乐等<sup>[12]</sup>提出基于灰度形态学、直方图拉伸、模糊增强、BLOB分析综合处理的检测方法实现了复杂背景下的空洞缺陷检测;张俊生

等<sup>[13]</sup>使用数学形态学实现了空洞缺陷的特征提取和自动分析;李伟等<sup>[14]</sup>提出自适应模板匹配的算法实现了较复杂背景下BGA焊点的提取和检测;也有学者采用计算机视觉、神经网络、支持向量机等方法进行缺陷检测<sup>[15-18]</sup>.但是二维检测的成像结果难以区分元器件的重叠信息,检测难度较大,计算所得空洞率误差较大,产品质量误判率较高;而基于X射线三维显微成像技术的三维检测方法可以在获得样品外观结构尺寸的基础上,同时获得内部复杂结构的高分辨率三维数字图像,因此三维检测方法可以直接观察到BGA芯片在焊接过程中产生的不同缺陷,成为BGA的空洞缺陷检测的新方法,使BGA缺陷检测开始从二维向三维过度<sup>[19-20]</sup>.

基于此,笔者提出一种基于X射线3D成像的BGA空洞缺陷检测方法.对BGA芯片进行CT扫描和三维模型重建并导出CT切片,使用全局阈值分割准确提取出焊球和空洞缺陷的特征,通过连通区域标记和积分法求得焊球体积及空洞率.通过该检测方法与常规二维检测的对比,凸显了该方法的优越性,并将阈值分割结果与BGA的DR图像数据比较,验证了该方法的准确性.

# 1 3D 检测方法

## 1.1 扫描与重建

本次实验使用的 X 射线三维显微镜为天津三英精密仪器股份有限公司生产的 nanoVoxel-4000,该设备具有 500 nm 的超高分辨率,可对样品内部显微结构进行精确检测.

使用 X 射线三维显微镜对 BGA 芯片结构进行扫描检测,再用 VoxelStudio Recon 软件进行三维重建.将三维重建之后的扫描对象表示为一组体素,其中每个体素具有对应于材料密度的灰度值.灰度值范围取决于重建软件 的参数设置,在本次实验中,重建软件的灰度值用 16 位二进制数表示,灰度值范围为 0~65 535.

一般假定 X 射线三维显微镜图像中的灰度值与材料密度成正比.实际上,X 射线三维显微镜图像中的灰度值与扫描材料的线性衰减系数有关.在实验室常规射线源的能量范围内,X 射线和材料之间的相互作用主要包括:光电效应和康普顿散射效应.

能量较低的光子吸收率较高从而产生光束硬化效应,会导致重建图像上出现“中心暗,边缘亮”的硬化伪影.另外,散射光子在邻近探测器通道中会产生串扰,还会致使材料边缘产生模糊,边缘模糊如图 1 所示.因此,为了提高三维模型的准确性,在重建过程中需要对数据进行校正处理<sup>[21-22]</sup>.

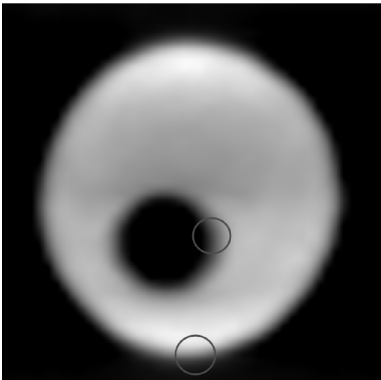


图 1 边缘伪影  
Fig. 1 Edge artifacts

重建完成之后通常选择可以将金属材料与 PCB 基板分离的灰度值对扫描对象进行 3D 可视化,图 2 显示了 BGA 芯片三维模型结构的可视化结果,可以清晰的观察到将 PCB 基板过滤之后的焊球、电阻、电容、通孔等元器件.

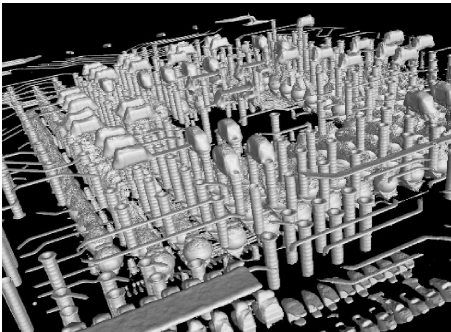


图 2 BGA 三维模型  
Fig. 2 3D model of BGA

## 1.2 3D 模型切片

目前使用 X 射线三维显微镜扫描技术对 BGA 芯片进行缺陷检测时,通常用定性方法将各个组件分离. BGA 芯片的各个组件由不同密度的材料组成,密度不同的材料对 X 射线的吸收率不同,因此各组件所显示的灰度值也有所不同.在 BGA 芯片扫描之后的像素直方图中,灰度值较低的波峰为 PCB 基板,灰度值较高的波峰为 BGA 焊球和电容等元器件,根据直方图选择合适的阈值将焊点与其他元件分离,分离结果如图 3 所示.

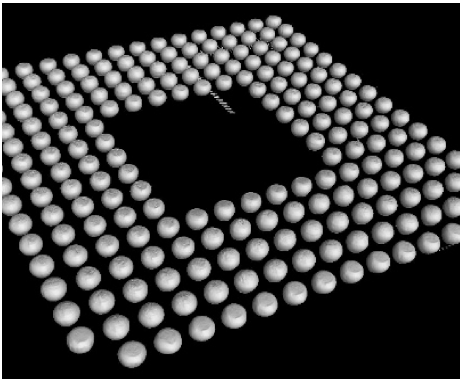


图 3 BGA 焊球  
Fig. 3 Solder balls of BGA  
得到分离的 BGA 焊球之后,使用体素

数据属性分析和 3D 可视化软件 VGStudio 单独提取出每个的焊球,进而将焊球按设定的距离切分成若干个切片,为使数据更加精确,切分单位设置为体素.不同深度 BGA 焊球切片的顶部、中部和底部有无缺陷的对比如图 4 所示.由图 4 可以看出,三维检测方法可以准确的分析焊球中空洞的位置和大小.

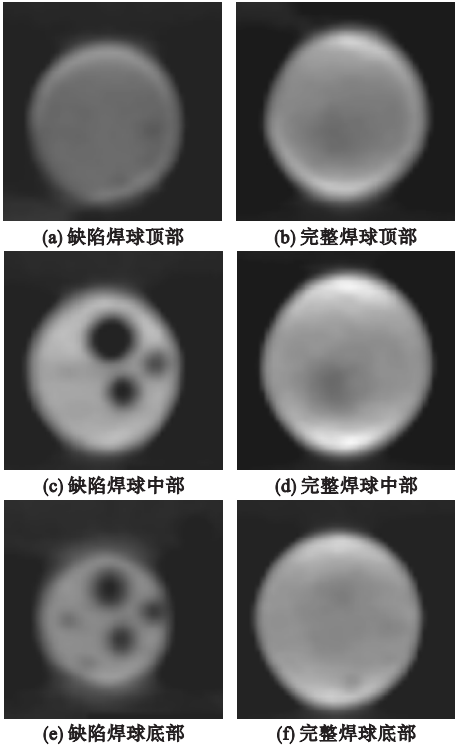


图 4 焊球的缺陷分布

Fig. 4 Defects throughout solder ball

1.3 全局阈值分割

使用 3D 检测方法得到的 BGA 焊球切片图像中,焊球及空洞缺陷的灰度对比比较大、轮廓较为清晰,与 2D 检测方法得到的图像相比,不存在多个元器件灰度值叠加的问题,根据图像特点,将使用全局阈值分割的方法进行缺陷特征提取.

全局阈值分割是指将灰度值大于阈值的像素设为白色,小于或者等于阈值的像素设为黑色.假设输入图像为  $I$ ,高为  $H$ 、宽为  $W$ , $I(r,c)$ 代表  $I$  的第  $r$  行第  $c$  列的灰度值, $0 \leq r < H, 0 \leq c < W$ ,全局阈值处理后的输出图像为  $O$ , $O(r,c)$ 代表  $O$  的第  $r$  行第  $c$  列的

灰度值,则:

$$O(r,c) = \begin{cases} 255, & I(r,c) > thresh; \\ 0, & I(r,c) \leq thresh. \end{cases} \quad (1)$$

式中: $thresh$  为分割阈值.

在阈值分割之前,首先将焊球的切片进行灰度化处理后得到灰度图像,该图像的灰度范围为  $0 \sim 255$ .全局阈值分割要求我们确定一个最佳的阈值,该阈值通过人机交互的方式根据目标和背景之间的灰度差异来确定.在 VGStudio 中可以通过调整渲染器的直方图灰度值大小查看目标的显示情况,因而容易找到区分 BGA 焊球和 PCB 板的灰度值边界,根据 BGA 焊球 3D 可视化的结果和灰度直方图选择固定阈值.由于 CT 扫描与三维重建时设置的图像灰度值范围为  $0 \sim 65\,535$ ,因此应该将 VGStudio 中得到的分割阈值归一化,使用归一化后的阈值对此灰度图像做全局阈值分割,得到 BGA 焊球及其空洞缺陷的二值图.

1.4 连通区域标记

二值图像连通区域标记是指对图像中不同连通区域中的像素设置唯一的标号,它被广泛地用在计算机视觉、模式识别和图像处理等领域.笔者使用 8 邻域模板对二值图像进行标记,以得到背景、焊球和空洞三种特征信息.

笔者使用的标记方法通过定位连通区域的内外轮廓来标记整个图像:首先从左至右、从上至下依次遍历图像,如图 5(a)所示.  $A$  为遇到一个外轮廓点(遍历过程中第一个遇到的白点即为外轮廓点),且没有被标记过,则给  $A$  一个新的标记号.从  $A$  点出发,按照一定的规则将  $A$  所在的外轮廓点全部跟踪到,然后回到  $A$  点,并将路径上的点全部标记为  $A$  的标号;如图 5(b)所示,如果遇到已经标记过的外轮廓点  $A'$ ,则从  $A'$  向右,将它右边的点都标记为  $A'$  的标号,直到遇到黑色像素为止;如图 5(c)所示,如果遇到了一个已经被标记的点  $B$ ,且是内轮廓的点(它的正

下方像素为黑色像素且不在外轮廓上), 则从  $B$  点开始, 跟踪内轮廓, 路径上的点都设置为  $B$  的标号; 如图 5(d) 所示, 如果遍历到内轮廓上的点  $B'$ , 则也是用外轮廓的标号去标记它右侧的点, 直到遇到黑色像素为止。

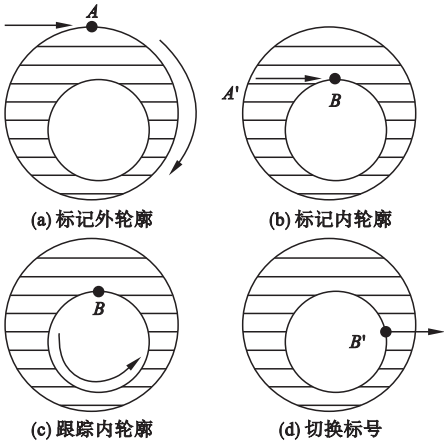


图 5 标记规则

Fig. 5 Marking rules

计算连通区域面积时, 将面积用像素点数量表示。使用标记累加法对图像中带有相同标记的像素点进行累加(如遇到标号为 1 的像素点就累加到 1 号连通区域), 以得到各连通区域像素点的数量。图像总面积, 即图像像素点总数用  $S_{\text{area}0}$  表示; 图像的背景定义为 1 号连通区域, 用  $S_{\text{area}1}$  表示; 焊球由焊料和空洞组成, 焊料定义为 2 号连通区域, 用  $S_{\text{area}2}$  表示; 空洞面积用  $S_{\text{area}3}$  表示, 标记示意图如图 6 所示。

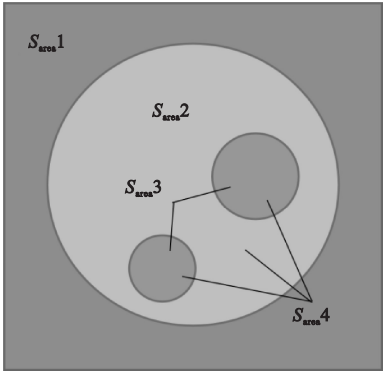


图 6 标记示意图

Fig. 6 Marking diagram

由于每个焊球中可能存在多个空洞, 将

所有空洞面积逐一累加较为复杂。为使计算更加快捷, 空洞部分的面积由图像像素点总数减去 1 号和 2 号连通区域像素点总数得到:

$$S_{\text{area}3} = S_{\text{area}0} - S_{\text{area}1} - S_{\text{area}2}. \quad (2)$$

焊球的面积由焊料和空洞面积相加得到, 用  $S_{\text{area}4}$  表示, 即:

$$S_{\text{area}4} = S_{\text{area}2} + S_{\text{area}3}. \quad (3)$$

1.5 计算体积及空洞率

BGA 焊球的切片图像是由 BGA 芯片三维模型等距切分得到的, 切分间距为  $h$ , 将模型等分为  $n$  份。每个切片中焊球面积  $S_{\text{area}4}$  与切分间距  $h$  求积便是该切片中焊球的体积; 同理, 每个切片中空洞面积  $S_{\text{area}3}$  与切分间距  $h$  求积便是该切片中空洞的体积。间距  $h$  越小则空洞体积的计算结果越精确, 模型又以体素为单位计数, 因此  $h$  以像素为单位进行取值。当像素值小于 1 时便无实际意义, 所以为了提高精确度将  $h$  设为 1 像素。第  $i$  个切片中焊球体积用  $v_{1i}$  表示, 空洞体积用  $v_{2i}$  表示, 表达式如下:

$$v_{1i} = S_{\text{area}4} \times h. \quad (4)$$

$$v_{2i} = S_{\text{area}3} \times h. \quad (5)$$

将所有切片中焊球的体积累加即可得到完整焊球的体积, 同理, 将所有切片中空洞的体积累加即可得到焊球中所有空洞的体积。完整焊球的体积用  $V_1$  表示, 完整空洞的体积用  $V_2$  表示, 表达式如下:

$$V_1 = \sum_{i=1}^n v_{1i}, \quad (6)$$

$$V_2 = \sum_{i=1}^n v_{2i}. \quad (7)$$

基于体积的焊球空洞率  $r$  为空洞体积  $V_2$  与焊球体积  $V_1$  求商, 表达式如下:

$$r = V_2 / V_1. \quad (8)$$

2 实验分析

使用 X 射线三维显微镜对 BGA 芯片样品扫描, 参数设置为电压 220 kV (影响 X 射

线束中的最大光子能量;调节电压可以改善材料的穿透效果),目标电流 110 uA(影响 X 射线束中的光子数量;调节目标电流可以改善对比度),曝光时间 3 秒/帧,射线源焦点与样品台旋转中心距离  $L_{OD}$  为 103 mm,射线源焦点与探测器中心距离  $L_{DD}$  为 740 mm,扫描帧数为 1 440 帧,图像分辨率为 17.659  $\mu\text{m}$ . 样品扫描完成后进行三维模型重建,在重建的模型中以单个体素为切片间距导出若干张切片图像.

2.1 检测方法对比

图 7 为使用 X 射线三维检测方法得到的 BGA 焊球切片图像,图中有效地将除焊点外的其他元器件过滤掉,只保留了焊球信息,大大降低了缺陷检测的难度.

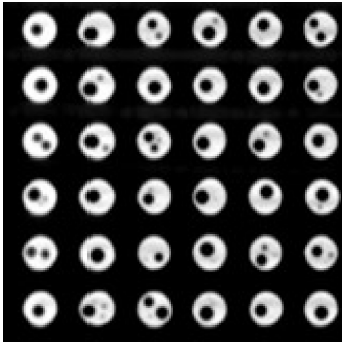


图 7 BGA 切片  
Fig. 7 Slices of BGA

图 8 为使用 X 射线二维缺陷检测方法获得的 BGA 焊球 DR 图像,图中有多个元件的图形信息叠加的情况,增加焊球特征提取和面积计算的难度,因此会直接影响检测质量.

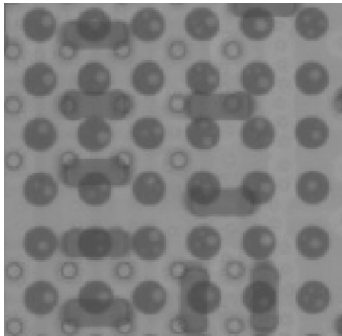


图 8 BGA DR 图像  
Fig. 8 DR image of BGA

通过图 7 与图 8 的对比,突显了 X 射线三维检测方法的优越性.

2.2 分割结果验证

图 9 显示了在 VGStudio 中 BGA 焊球三维模型切片内标记的灰度值为 10 134(全局阈值分割所选灰度值)的等值面,并分别测量出此时焊球和空洞的直径;图 10 显示了在焊球的 DR 图像中使用 VoxelStudio Recon 测量的焊球直径和空洞直径. 在 VGStudio 的默认坐标系中 1 像素等于 1 mm;为了方便两种测量值的对比,在 VoxelStudio Recon 中将尺寸重新标定为 1 像素等于 1 mm,而实际尺寸为 1 像素等于 0.018 mm,焊球实际尺寸为 0.6 mm 左右.

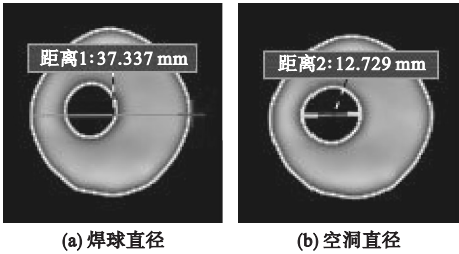


图 9 切片测量数据

Fig. 9 Measurement data of the slices

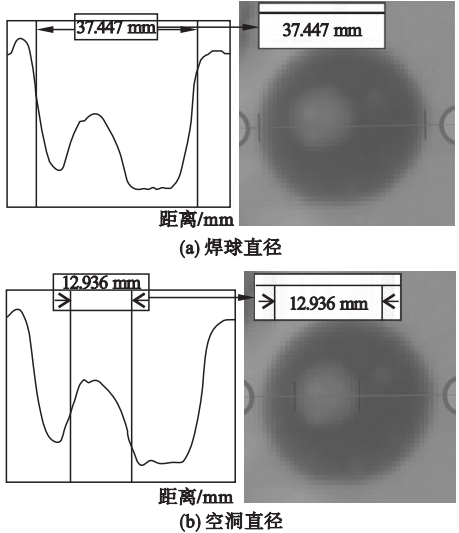


图 10 DR 测量数据

Fig. 10 Measurement data of DR

将 BGA 模型切片和 DR 图像中焊球直径和空洞直径尺寸的测量数据进行统计,统计结果如表 1 所示. 对于包含多个空洞的焊

球,选择其中一个空洞进行测量,尺寸单位为像素. BGA 模型切片图像与 DR 图像对比最大误差为 0. 207 像素(3. 726  $\mu\text{m}$ ),结果表明了全局阈值分割的准确性和优越性.

表 1 焊球及空洞直径

焊球 编号	DR 图像		切片图像	
	焊球直 径/mm	空洞直 径/mm	焊球直 径/mm	空洞直 径/mm
1	37. 447	12. 936	37. 337	12. 729
2	33. 952	8. 581	34. 012	8. 547
3	35. 261	10. 684	35. 304	10. 715
4	36. 035	7. 863	35. 983	7. 856

2. 3 实验结果

对切片图像做灰度化处理并进行全局阈值分割. 根据 BGA 重建模型的 3D 可视化结果和灰度直方图选择 10 134 作为分割阈值, 10 134 为原始数据灰度值,归一化后分割阈值为 39. 43,分割结果如图 11 所示.

将所有切片中焊球及空洞的面积分别与切分间距作积后累加得到完整焊球及空洞的体积,并计算出空洞率,计算结果统计如表 2 所示. 空洞率是判断 BGA 产品是否合格的依据,空洞率过大会影响焊球的导电性,从而 影响产品质量,因此可以根据计算结果对产品进行检验.

表 2 焊球及空洞体积

Table 2 Solder balls and void volumes			
焊球 编号	焊球体积 (体素)	空洞体积 (体素)	空洞率/%
1	18 673	712	3. 81
2	17 554	901	5. 13
3	19 288	729	3. 78
4	19 856	1 127	5. 68

3 结 论

(1)所提方法可有效去除图像中多元器件重叠的不利因素,可以直接观察空洞缺陷的大小及位置,比 2D 检测方法更具优越性.

(2)通过 BGA 模型切片图像和 DR 图像中焊球及空洞尺寸的测量与对比,测得最大阈值分割误差为 3. 726  $\mu\text{m}$ ,表明该方法可以准确地提取空洞缺陷.

(3)该方法可以计算出焊球和空洞的体积及基于 3D 数据的体积空洞率,有效地完成了 BGA 的空洞缺陷检测.

(4)该方法依赖于 X 射线 3D 成像的空间分辨率,分辨率较低的数据体误差较大,所以提高扫描和重建质量有助于空洞缺陷的研究.

参考文献

[ 1 ] 杨兵,刘颖. BGA 封装技术[J]. 电子与封装, 2003,3(4) :6 - 13.  
( YANG Bing, LIU Ying. BGA packaging technology [J]. Electronics & packaging,2003,3 (4) :6 - 13. )  
[ 2 ] 罗伟承,刘大全. BGA/CSP 和倒装焊芯片面积阵列封装技术[J]. 中国集成电路,2009,18 (2) :49 - 55.  
( LUO Weicheng, LIU Daquan. Area array

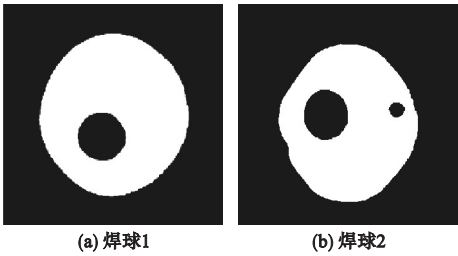


图 11 焊球二值图像

Fig. 11 Binary image of solder balls

对阈值分割后的二值图做连通区域标记并以不同颜色显示,标记结果如图 12 所示. 连通区域标记图中,红色区域为背景,蓝色区域为焊料,其他区域为空洞.

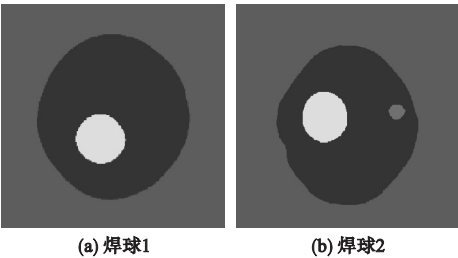


图 12 连通区域标记

Fig. 12 Label of connected components

- package-BGA/CSP & flip chip [J]. China integrated circuit, 2009, 18(2): 49-55.)
- [3] 夏石川. BGA 内部缺陷检测技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2014.  
(XIA Shichuan. The technology of internal defects detection for BGA [D]. Taiyuan: North University of China, 2014.)
  - [4] PAVEL ŘÍHÁK, VALA R, SZENDIUCH I. Detection of defects on BGA solder balls using 2D and 3D methods [C]. International Spring Seminar on Electronics Technology, 2015.
  - [5] 王树清, 文大化. 混装条件下 BGA 焊点空洞问题[J]. 电子工艺技术, 2012(5): 289-291.  
(WANG Shuqing, WEN Dahua. Solder cavity problems of BGA under mixing assembly [J]. Electronics process technology, 2012(5): 289-291.)
  - [6] 王文利, 梁永生. BGA 空洞形成的机理及对焊点可靠性的影响[J]. 电子工艺技术, 2007, 28(3): 157-159.  
(WANG Wenli, LIANG Yongsheng. Formation mechanism of BGA void and effects on solder joint reliability [J]. Electronics process technology, 2007, 28(3): 157-159.)
  - [7] 吴军. BGA 焊点空洞问题分析[J]. 电子工艺技术, 2013(4): 223-225.  
(WU Jun. Analysis and research of solder voids for BGA [J]. Electronics process technology, 2013(4): 223-225.)
  - [8] 熊华清, 李春泉, 尚玉玲. BGA 焊点空洞对信号传输性能的影响[J]. 半导体技术, 2009, 34(10): 946-948.  
(XIONG Huaqing, LI Chunquan, SHANG Yuling. Effect of BGA solder joint void on signal transmission performance [J]. Semiconductor technology, 2009, 34(10): 946-948.)
  - [9] SA-NGUANNAM A, SRINONCHAT J. Analysis ball grid array defects by using new image technique [C]. International conference on signal processing, 2008.
  - [10] PENG S H, NAM H D. BGA void detection in X-ray images based on a new blob detector [C]. International congress on image & signal processing, 2011.
  - [11] PENG S H, NAM H D. Void defect detection in ball grid array X-ray images using a new blob filter [J]. Journal of Zhejiang university science C, 2012, 13(11): 840-849.
  - [12] 李乐, 陈忠, 张宪民. 复杂背景下 X 射线 BGA 焊点气泡检测[J]. 焊接学报, 2015, 36(3): 80-84.  
(LI Le, CHEN Zhong, ZHANG Xianmin. Void detection of BGA solder joints under complex X-ray imaging background [J]. Transactions of the China welding institution, 2015, 36(3): 80-84.)
  - [13] 张俊生, 王明泉, 郭晋秦, 等. 球栅阵列焊点空洞缺陷的数学形态学分析[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(2): 296-299.  
(ZHANG Junsheng, WANG Mingquan, GUO Jinqin, et al. Analysis of void defects in BGA solder joints with mathematical morphology [J]. Science technology and engineering, 2018, 18(2): 296-299)
  - [14] 李伟, 朱少君, 闫帅, 等. 基于自适应模板匹配的 BGA 焊点检测[J]. 自动化与仪器仪表, 2016(11): 78-81.  
(LI Wei, ZHU Shaojun, YAN Shuai, et al. Based on an adaptive template matching method to conduct detection of BGA solder joints [J]. Automation & instrumentation, 2016(11): 78-81.)
  - [15] 周颖, 王雪, 刘坤, 等. 基于小波特征与支持向量机的焊点缺陷识别方法的研究[J]. 河北工业大学学报, 2015, 44(1): 6-11.  
(ZHOU Ying, WANG Xue, LIU Kun, et al. Study on recognition method of solder joint defects based on wavelet feature and support vector machine [J]. Journal of Hebei university of technology, 2015, 44(1): 6-11.)
  - [16] 刘志鹏, 张奇志, 周亚丽. 基于机器视觉的 BGA 焊盘缺陷检测[J]. 北京信息科技大学学报(自然科学版), 2016, 31(6): 84-89.  
(LIU Zhipeng, ZHANG Qizhi, ZHOU Yali. Defect detection of BGA pads based on machine vision [J]. Journal of Beijing information science & technology university, 2016, 31(6): 84-89.)
  - [17] 陈玉. 基于机器视觉的焊点缺陷检测算法研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2015.  
(CHEN Yu. Research of solder joint detection based on computer vision [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2015.)
  - [18] 彭涛. 基于神经网络的 PCB 板焊点显微图像质量检测技术研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2014.  
(PENG Tao. Research on the quality testing of PCB board microscopic images based on neural networks [D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2014.)
  - [19] ION T, LOUIS Z, CATALIN-STEFAN T, et al. Accurate 3D modeling of cable in conduit conductor type superconductors by X-ray microtomography [J]. Fusion engineering and design, 2015, 98/99: 1176-1180.
  - [20] NIKISHKOV Y, AIROLDI L, MAKEEV A. Measurement of voids in composites by X-ray computed tomography [J]. Composites science and technology, 2013, 89: 89-97.
  - [21] 蔡玉芳, 李丹, 王珏. 工业 CT 图像边缘伪影校正[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(3): 755-761.  
(CAI Yufang, LI Dan, WANG Jue. Edge artifact correction for industrial computed tomography images [J]. High power laser and particle beams, 2013, 25(3): 755-761.)
  - [22] 陈云斌, 陈思, 李敬. 硬化伪影的新型表现形式及其校正[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28(10): 89-93.  
(CHEN Yunbin, CHEN Si, LI Jing. Form and correction of a new type of artifact induced by beam hardening [J]. High power laser and particle beams, 2016, 28(10): 89-93.)
- (责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)